

# 圧密養生したセメント安定処理土の強度に及ぼす排水条件と寸法効果の影響

田口 岳志  
鈴木 素之  
山本 哲朗  
半田 祥一

山口大学大学院博士後期課程  
山口大学大学院理工学研究科  
山口大学大学院理工学研究科  
山口大学工学部

## 1. はじめに

セメント系固化材による安定処理工法は軟弱地盤の沈下低減、地震時の変形抑止等を目的として広く用いられている。安定処理土地盤は種々の要因により現場強度にばらつきがみられ、実施工ではこの点を考慮して固化材の配合設計の段階で安全側の設計がなされている<sup>1)</sup>。また、現場で運転できる施工機械の性能や同様の工事の施工実績に基づいて設計定数が採用されることも少なくない。近年の建設事業においては環境負荷およびコストの削減が求められており、安定処理土地盤の設計では、強度のばらつきを適切に評価した設計法の確立が進められている。

安定処理土の強度に及ぼす影響因子は多くあるが、原位置での応力状態に着目すれば処理地盤中の土要素は、図-1に示すように、固化処理直後から自重や土構造物による土被り圧を受けた状態にあり、固化未了の段階において、圧密による密度増加に伴う強度増加が見込まれる<sup>2)</sup>。すなわち安定処理土地盤では圧密と水和反応による硬化が同時に進行していると考えられ、現位置で発現される強度の予測を行う際には、室内配合試験においても処理土共試体に対し、予測される施工深度や施工初期段階で作用する荷重に応じた上載圧を作用させ養生することが必要と考えられる。

著者らは上載圧を作用させて安定処理土を養生させることを圧密養生と定義しており、図-2に示すように、安定処理土の一軸圧縮強度は養生時の上載圧の増加に対して直線的に増加し、増加の度合いは、安定材の種類および添加量などによって変化することを明らかにしている<sup>2)</sup>。本研究では、この特性を踏まえた上で、新たに処理土の強度に与える影響因子として、改良コラムの排水条

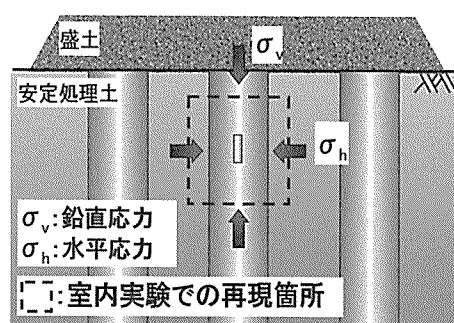


図-1 安定処理地盤モデル

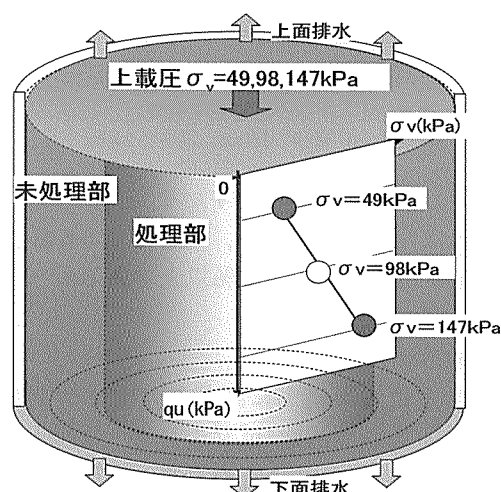


図-2 タンク圧密養生装置強度分布モデル

件および寸法効果を取り上げ、これに由来する強度変化を調べた。

## 2. 試験概要

### (1) 試料土・固化材

本試験で用いた土試料はカオリン（土粒子密度 $\rho_s=2.618\text{g/cm}^3$ 、最大粒径 $D_{\max}=0.2\text{mm}$ 、液性限界 $w_L=62.0\%$ 、塑性指数 $I_p=21.8$ 、細粒分含有率 $F_c=56.4\%$ ）である。また、安定材は一般軟弱土用

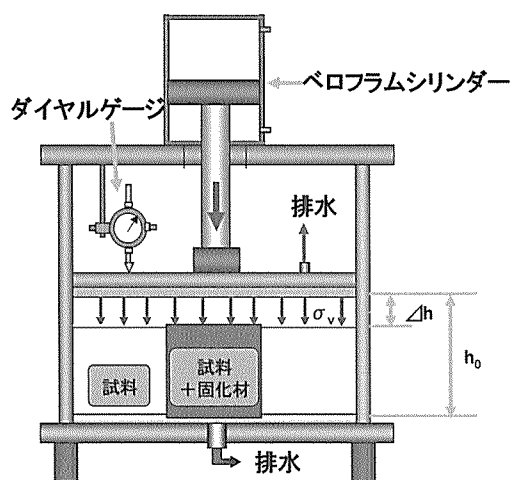


図-3 タンク圧密養生装置（概略図）

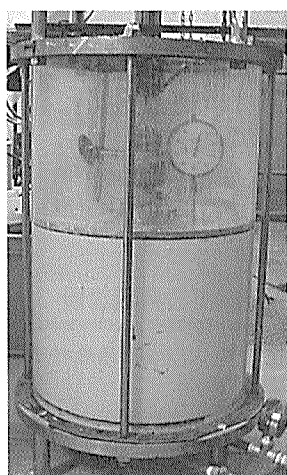


写真-1 タンク圧密養生装置  
（改良土）直径：180mm，高さ：240mm

固化材（以下、固化材と称す）を用いた。固化材の成分は  $\text{SiO}_2$ ：15～25%， $\text{Al}_2\text{O}_3$ ：3.5%以上， $\text{CaO}$ ：40～70%， $\text{SO}_3$ ：4.0%以上である。

## (2) 試験方法

初期含水比  $w_0=70\%$  に調整したカオリンに固化材を添加量  $Q_c=50\text{kg}/\text{m}^3$  でスラリー添加し，水セメント比  $w/c=70\%$  とした。タンク圧密養生装置にて上載圧  $\sigma_v=49, 98, 147\text{kPa}$  で7日間圧密養生を行った。土試料と固化材の配合手順は地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法（JGS0821-2000）」<sup>3)</sup> に準じている。図-3および写真-1に示すタンク圧密養生装置にカオリンを詰め，タンク圧密養生装置の中にステンレス製ケーシングを入れる。ケーシング中のカオリンに固化材を混入し，5分間攪拌した後，所定の上載圧を作用させた状態で養生する（中央改良）。養生後，装置から処理土コラムのみを取り出し，供試体直径3cm，高さ6cmになるように整形する。このとき上下端面は平滑に仕上げベディングエ

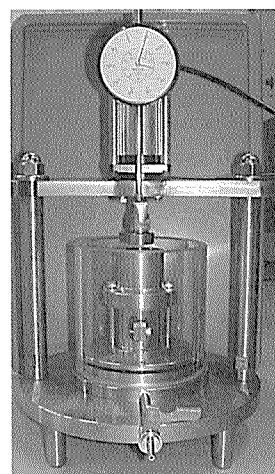


写真-2 小型圧密養生装置  
（改良土）直径：30mm  
高さ：60mm

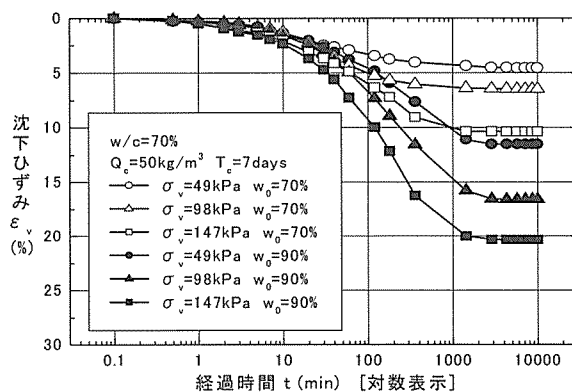


図-4 沈下ひずみ  $\epsilon_v$  と経過時間  $t$  の関係

ラーの発生を抑える。その後，整形した供試体により一軸圧縮試験を実施した。

上記の基本手順に加え，含水比の検討では  $w_0=90\%$  のカオリンを用い，排水条件の検討では，小型圧密養生装置（写真-2）<sup>4)</sup> を用いて作製した圧密養生供試体の一軸圧縮試験結果を含めて検討した。安定処理土の寸法効果の検討ではタンク内を全改良し，改良コラムから高さが異なる供試体（ $H=60\text{mm}, 100\text{mm}, 120\text{mm}, 180\text{mm}, 200\text{mm}$ ）を5種類準備し，一軸圧縮強度の比較を行った。

## 3. 試験結果と考察

### (1) 初期含水比の影響

表-1にタンク圧密養生装置により中央改良した処理土を初期含水比  $w_0=70\%$  に調整した場合の試験結果を示し，表-2に  $w_0=90\%$  の場合の試験結果を示す。

図-4に沈下ひずみ  $\epsilon_v$  と経過時間  $t$  の関係を示す。 $\epsilon_v$  は圧密養生装置で測定した沈下量  $\Delta H$  を供試体初期高さ  $H_0$  で除して百分率表示したもので

表-1  $w_0=70\%$ に調整した処理土の試験結果

Test No.	改良材	養生期間	上載圧 $\sigma_v$ (kPa)	最終沈下ひずみ $\varepsilon_v$ (%)	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	一軸圧縮強度 $q_u$ (kPa)	圧密終了後含水比 $w$ (%)
1	固化材	7	49	4.55	1.498	270	64.1
2				4.55	1.517	308	63.9
3				4.55	1.523	324	62.8
4			98	6.50	1.516	434	62.4
5				6.50	1.546	473	62.3
6				6.50	1.557	503	62.1
7			147	10.38	1.566	650	60.4
8				10.38	1.587	701	60.3
9				10.38	1.602	751	59.8

表-2  $w_0=90\%$ に調整した処理土の試験結果

Test No.	改良材	養生期間	上載圧 $\sigma_v$ (kPa)	最終沈下ひずみ $\varepsilon_v$ (%)	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	一軸圧縮強度 $q_u$ (kPa)	圧密終了後含水比 $w$ (%)
1	固化材	7	49	11.52	1.466	213	80.5
2				11.52	1.472	226	81.6
3				11.52	1.478	268	77.9
4			98	16.60	1.511	320	76.1
5				16.60	1.513	371	75.3
6				16.60	1.512	400	73.8
7			147	20.33	1.539	451	71.8
8				20.33	1.547	522	71.0
9				20.33	1.557	589	69.3

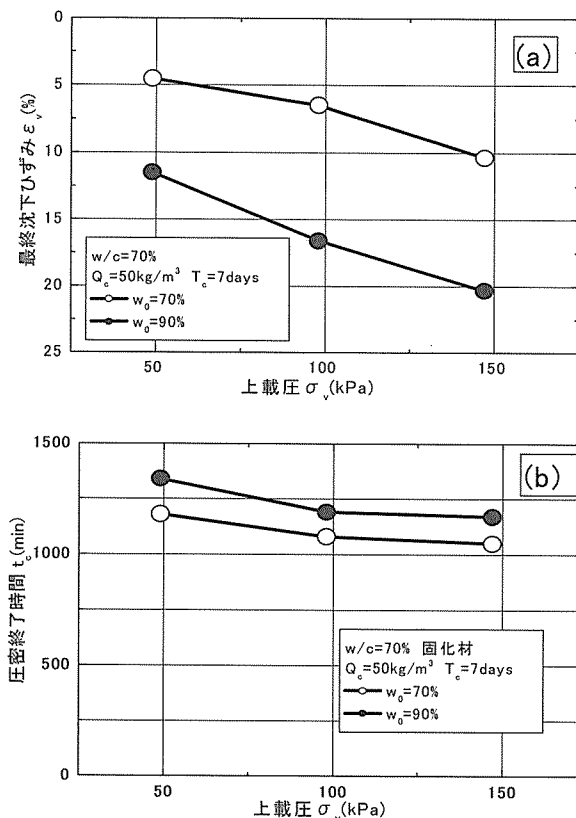


図-5 最終沈下ひずみ  $\varepsilon_v$  及び圧密終了時間  $t_c$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係

ある。この図より、養生時間7日が経過した段階で、両含水比の試料ともに、 $\sigma_v$ の増加に伴い  $\varepsilon_v$  が大きくなっており、 $w_0=70\%$ の場合の方が90%の場合よりも最終的な沈下ひずみが小さくなっている。

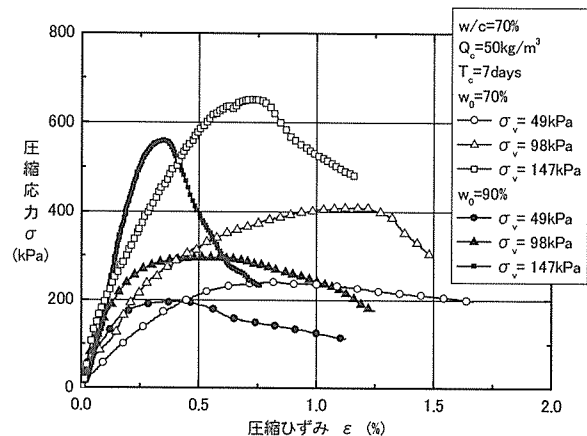


図-6 圧縮応力  $\sigma$  と圧縮ひずみ  $\varepsilon$  の関係

図-5に最終沈下ひずみ  $\varepsilon_v$  及び圧密終了時間  $t_c$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係を示す。ここで圧密終了時間  $t_c$  については土の圧密試験の際に3t法によって得られる圧密打ち切り時間を適用している。図-5(a)から、上載圧ごとに  $\varepsilon_v$  が大きくなることに加え、 $w_0=90\%$ の方が70%の2倍以上の値を示している。図-5(b)で、 $w_0=70\%$ の場合の方が90%の場合よりも  $t_c$  が小さくなっている。

図-6に圧密養生に引き続き実施した一軸圧縮試験結果である圧縮応力  $\sigma$  と圧縮ひずみ  $\varepsilon$  の関係を示す。両含水比の処理土とも上載圧  $\sigma_v$  の増加に伴って、応力ひずみ曲線が上方に推移する。また、上載圧によらず、 $w_0=70\%$ のものが  $w_0=90\%$ のものを上回っている。

図-7に  $q_u$  と  $\sigma_v$  の関係を示す。この図より、

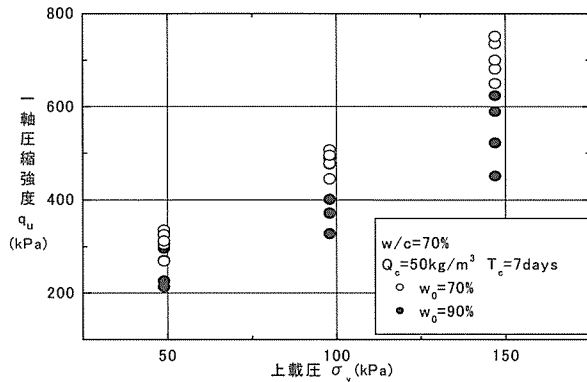


図-7 一軸圧縮強度  $q_u$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係

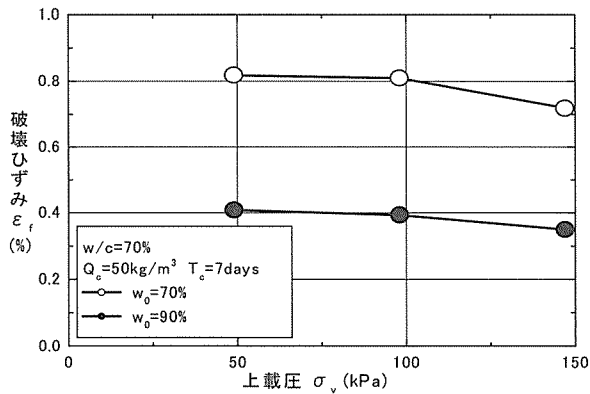


図-8 破壊ひずみ  $\epsilon_f$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係

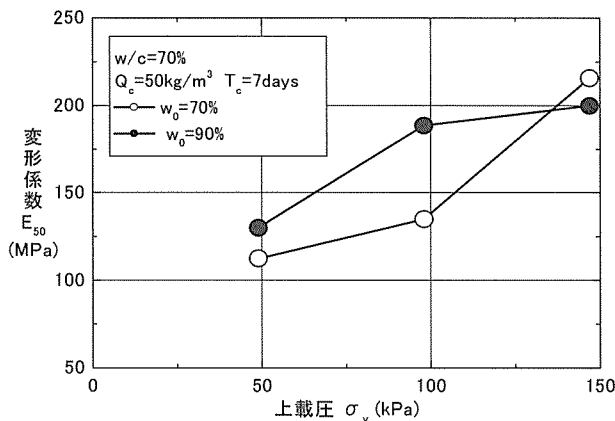
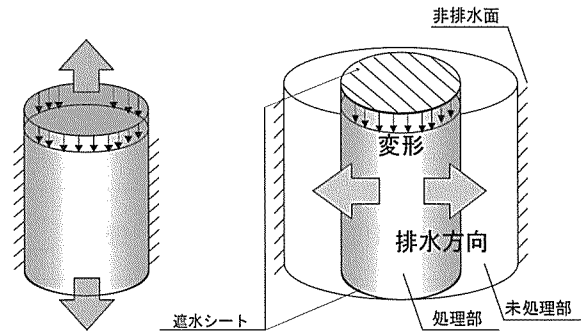


図-9 変形係数  $E_{50}$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係

各上載圧において  $w_0=70\%$  の方が  $90\%$  のものに比べて高い強度を示している。また、 $q_u$  は  $w_0=90\%$  のものに着目すれば、 $\sigma_v=149\text{kPa}$  では  $100\sim 200\text{kPa}$  のばらつきがみられた。このことから土の初期含水比が高いほど、また上載圧が大きいくほど、安定処理土の強度にばらつきが現れやすいことが推察される。

図-8 に破壊ひずみ  $\epsilon_f$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係を示す。この図から、全ての上載圧において、 $70\%$  の場合の  $\epsilon_f$  が  $90\%$  の場合を上回っている。これは  $70\%$  の場合の処理土供試体が硬質であるため、破壊挙動がより脆性的になったためと考えられる。図-9 に変形係数  $E_{50}$  と上載圧  $\sigma_v$  の関係を示す。



(a) 小型圧密養生装置

(b) タンク圧密養生装置

図-10 排水経路の違いと供試体の圧密変形 (模式図)

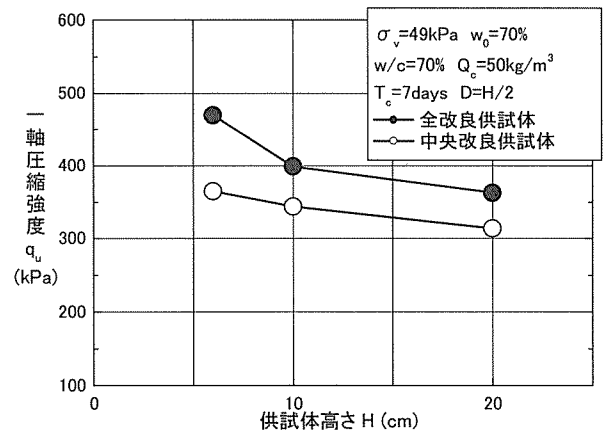


図-11 一軸圧縮強度  $q_u$  と供試体高さ  $H$  の関係

両含水比の処理土供試体とも上載圧が大きくなるごとに、変形係数も大きくなっていることがわかる。

## (2) 排水条件の影響

実際に施工される安定処理土は、現位置における地層構成や混合率を考慮した水セメント比等により様々な排水条件下で養生されているものと考えられる。このことを室内で再現するために2種類の排水条件を採用し、その影響について検討した。

図-10に示すように(a)の小型圧密養生装置は両側面がモールドで封じられているため、排水経路は縦排水に限られる。また(b)のタンク圧密養生装置で中央部のみを改良した場合は、上下面を遮水シートで覆うため、排水経路は横排水に限られる。このときタンク内を全て改良した場合、排水経路は(a)と同様に縦排水のみを許すものとした。

図-11に一軸圧縮強度  $q_u$  と供試体高さ  $H$  の関係を示す。図中のプロットの○はタンク圧密養生装置により中央部のみ改良し、圧密した中央改良コラムから抽出した中央改良供試体（以下、“中央改良”と称す）であり、それぞれ、供試体高さ  $H=6\text{ cm}$ 、 $10\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm}$  に整形した供試体の一軸圧

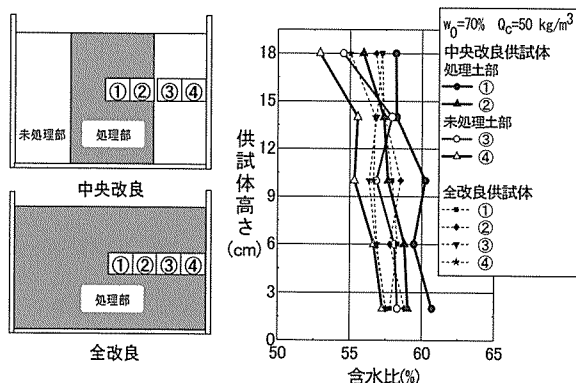


図-12 タンク中央改良および全改良のタンク内含水比分布

縮強度  $q_u$  である。もう一方の全改良供試体（図中の記号：●）は、圧密容器内を全て改良した場合のものである。このとき、 $H=6\text{ cm}$ のプロットのみ小型圧密養生装置により全改良した処理土供試体の  $q_u$  を示したもので、 $H=10\text{ cm}$ ,  $20\text{ cm}$  はタンク圧密養生装置によりタンク内を全て改良した中心部から抽出した供試体の  $q_u$  を示す。中央改良（図中の記号：○）の方が、全ての供試体高さにおいて、 $q_u$  が14～23%程度小さくなっている。

次いで、図-12にタンク圧密養生装置によるタンク中央改良及び全改良のタンク内の含水比分布を示す。この図より、中央改良の方が処理土部の含水比が高いことがわかる、このことから全改良供試体と中央改良供試体の  $q_u$  の差異は養生後の含水比の違いによるものと考えられる。また、中央改良、全改良を個々にみると、全改良の方が、含水比のばらつきが小さくなっており、さらに中央改良は中央部の方から、側方の未処理部に向かって、含水比が小さくなっていく。このことより、中央改良の場合、水の流れは側面部から中央部に向かっていていると考えられ、固化材の水和反応によって、中央改良コラムの吸水作用が生じたためと推測される。

### (3) 寸法効果の影響

図-11において、改良範囲にかかわらず供試体高さ  $H$  が大きいほど、一軸圧縮強度  $q_u$  が低下する傾向がみられた。これを詳細に調べるため、タンク圧密養生装置にて作成した全改良供試体の高さを変化させて、一軸圧縮試験を行った。図-13に全改良コラムから供試体を抽出した際の一軸圧縮強度  $q_u$  と供試体高さ  $H$  の関係を示す。供試体高さ  $H=6\text{ cm}$  では、350～390kPa の強度を示し、供試体高さが大きくなるにつれて強度が低下している。次いで、中央改良コラムから取り出した供試体を高さ  $H=6\text{ cm}$ ,  $20\text{ cm}$  に整形した供試体を上

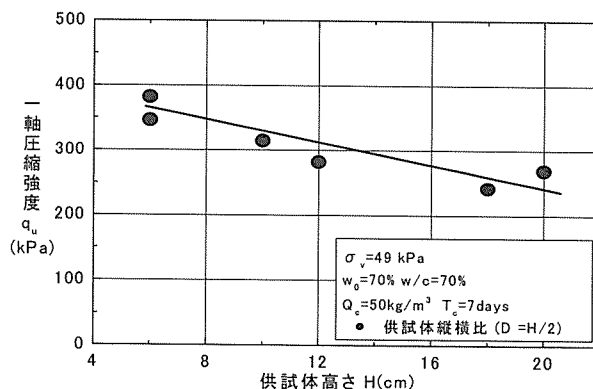


図-13 一軸圧縮強度  $q_u$  と供試体高さ  $H$  の関係（全改良）

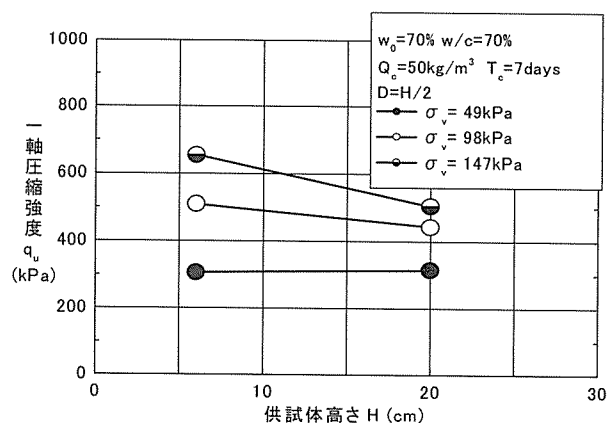


図-14 一軸圧縮強度  $q_u$  と供試体高さ  $H$  の関係（中央改良）

載圧別に一軸圧縮試験を行った結果を図-14に示す。この図から、供試体高さに関係なく、上載圧が大きいほど、一軸圧縮強度も高くなっており、また  $q_u$  は  $\sigma_v=49\text{ kPa}$  において、 $H=6\text{ cm}$ ,  $20\text{ cm}$  ともに大きな変化はなく、 $\sigma_v=98\text{ kPa}$  以降の上載圧においては、上載圧が大きいほど供試体の高さによる強度の低下が著しい。このことから、圧密による強度増加が大きかった供試体ほど寸法効果の影響を受けやすいことが推察される。

供試体高さが大きくなるにつれて、一軸圧縮強度  $q_u$  が小さくなるという結果は、大きな岩ほど小さな岩よりも弱い欠陥や傷を含む割合が高くなることにより強度が低下するという最弱リンクモデルと類似しており、処理土供試体においても、寸法の大きいものの方が小さいものに比べて、セメントの混合率が悪くなるなどの欠陥が増大することにより強度低下を招いているものと考えられる。このことについては、林ら<sup>9)</sup>によって調べられており、供試体の大きさを無限大に近づけると強度は0に近づくとしている。また、宮崎ら<sup>10)</sup>は、無欠点小試験体の大きさが一軸圧縮強度及び縦ヤング係数に及ぼす影響を調べ、供試体の容積が小さくなるに従い、一軸圧縮強度が大きくなる傾向を明らかとしている。本実験におけるタンク圧密

養生による処理土供試体についても、宮崎らと同等の結果を示しており、安定処理土の設計を行なう際には、その点を十分考慮し、強度減少率を考慮する必要がある。また、本実験で作成した改良コラムから、供試体高さの異なる処理土供試体を抽出し、強度を比較することで、現場で用いる巨大な安定処理土コラムの強度を予測することも可能であると考えられる。

## 4. 結 論

本研究では、タンク圧密養生装置を用いて、上載圧下で養生したセメント固化処理土の実地盤における排水条件を再現した実験を行い、強度に及ぼす養生条件の影響および供試体寸法の影響について調べた。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 中央改良した処理土供試体の含水比を変化させた場合、処理時の含水比が70%のものより90%のものの方が最終的な沈下ひずみは大きくなり、その後に実施した一軸圧縮試験では、処理時の含水比の低い安定処理土供試体の方が高い強度を示した。
- 2) 一軸圧縮強度と上載圧の関係から処理時の含水比が高いものほど、また圧密養生時の上載圧が大きいものほど、安定処理土供試体の一軸圧縮強度にみられるばらつきは大きくなる。
- 3) タンク中央改良により作製した横排水供試体は、縦排水供試体と比較して、一軸圧縮強度は14～23%程度小さくなる。また、このとき横排水供試体と縦排水供試体の含水比分布を比較した結果、横排水供試体の含水比が高くなる。これは、横排水改良コラムに未処理土からの吸水作用が生じているためと推察される。
- 4) 改良コラムから抽出した処理土供試体の一軸圧縮強度は、縦横比を一定として供試体寸法を変化させた場合、排水条件の違いによらず処理土供試体が大きいほど低下する。

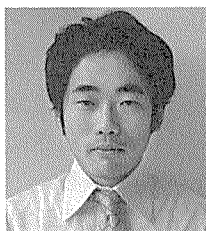
## 5. おわりに

本報では、上載圧下で養生したセメント安定処理土の強度に与える影響因子として、改良コラムの排水条件および寸法効果を探り上げ、これに由来する処理土の強度変化を調べた。今後は、このような研究成果を応用し、実施工における合理性・経済性に優れた安定処理土地盤の設計法を確立することが課題といえる。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.159-161，2001.
- 2) 山本哲朗，鈴木素之，岡林茂生，藤野秀利，田口岳志，藤本哲生：上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮強度特性，土木学会論文集，No. 701/Ⅲ-58，pp.387-399，2002.
- 3) 地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，2000.
- 4) 鈴木素之，山本哲朗，藤本哲生，岡林茂生，河原陽子：セメント安定処理した特殊土の圧密養生効果，第38回地盤工学研究発表会発表講演，pp.885-886，2003.
- 5) 林規夫，落合英俊，安福規之，大嶺聖：セメント安定処理土の寸法効果の評価に関する考察，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2409-2410，1997.
- 6) 宮崎直希，椎名聡，竹村雅行，大塚秀三：無欠点小試験体の大きさが一軸圧縮強度及び縦ヤング係数に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集 pp.953-954，2004.

## 著者略歴



**田口 岳志**

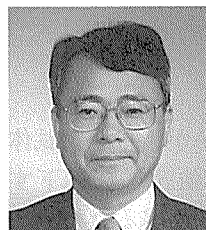
(たぐち たけし)

- 2002年 山口大学大学院理工学研究科社会建設工学専攻修了
- 2002年 株式会社藤井基礎設計事務所
- 2007年 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程設計工学専攻修了
- 2007年 佐賀大学低平地研究センター センター講師 博士(工学)

**鈴木 素之**

(すずき もとゆき)

- 1998年 信州大学大学院博士後期課程修了
- 1998年 山口大学工学部社会建設工学科助手
- 2007年 山口大学大学院理工学研究科助教 博士(工学)，技術士(建設部門)



**山本 哲朗**

(やまもと てつろう)

- 1990年 山口大学工学部社会建設工学科助教授
- 1997年 山口大学工学部社会建設工学科教授
- 2006年 山口大学大学院理工学研究科教授 工学博士

**半田 祥一**

(はんだ しょういち)

- 2007年 山口大学工学部社会建設工学科卒業
- 2007年 大豊建設株式会社入社